

# Eingebettete Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur

Entwicklung und Erprobung von eingebetteten Multi-Sensor-Systemen für die kontinuierliche Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur im operativen Betrieb

**BENJAMIN BAASCH | JUDITH HEUSEL |  
JÖRN GROOS | SANGEETHA SHANKAR**

**Im BMVI-geförderten Projekt HavenZuG wird ein System zur vorausschauenden eingebetteten Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur prototypisch entwickelt und im operativen Betrieb erprobt. Ziel des Projektes ist es, erforderliche Daten, Informationen und Erfahrungen zu sammeln, um sowohl die Erfolgsaussichten, Aufwände und Risiken einer dem Projekt nachgelagerten Produktentwicklung als auch den Einsatz solcher Systeme auf deutschen Hafenbahnen anhand der Anforderungen der Hafenwirtschaft bewerten zu können.**

Eine kontinuierliche Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur ist die Grundvoraussetzung für die Beobachtung von sich im Laufe der Zeit entwickelnden Fehlzuständen sowie für das frühzeitige Erkennen von spontan auftretenden Fehlern wie Schienenbrüchen. Beides ermöglicht die Erhöhung der Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit der Gleisinfrastruktur und reduziert die Lebenszykluskosten. Die etablierten Inspektionsverfahren mit handgeführten Messgeräten oder dezidierten Messfahrzeugen sowie Sichtprüfungen bei Streckenbegehungen bieten, aufgrund der da-

mit verbundenen Kosten und Einschränkungen der Anlagenverfügbarkeit, aus ökonomischen Gründen diese Möglichkeit nicht. Hingegen ist der Einsatz von Multi-Sensor-Systemen auf Schienenfahrzeugen im regulären Betrieb (eingebettete Systeme) ein innovativer Ansatz für die kontinuierliche Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur [1].

Das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. DLR entwickelt und betreibt seit 2015 eigene Multi-Sensor-Systeme zu diesem Zweck [2, 3]. Gemeinsam mit der IS Predict GmbH, der Vossloh Rail Services sowie den Häfen Braunschweig und Hamburg werden diese Systeme nun entsprechend der Anforderungen von Hafenbahnbetreibern weiterentwickelt. Im vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen des Förderprogramms für Innovative Hafentechnologien (IHATEC) geförderten Projekts HavenZuG (Hafenbetrieboptimierung durch vorausschauende eingebettete Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur [4]) erfolgt die Erprobung und Evaluierung im operativen Rangierbetrieb. In diesem Projekt wird das Gesamtsystem, bestehend aus Multi-Sensor-Systemen auf den Rangierfahrzeugen sowie einem Hintergrundsystem zur automatischen Datenanalyse und Informationsbereitstellung, prototypisch aufgebaut und in den Häfen Hamburg und Braunschweig in operativer Umgebung erprobt. Die Datenaufnahme mit eingebetteten Sensoren soll sowohl in gezielten Messkampagnen unter kontrollierten Bedingungen (Fahrgeschwindigkeit, Beladung, Wetter) als auch im Dauerbetrieb erfolgen. Die erhobenen Messdaten bilden die Grundlage für die Entwicklung von Analyseverfahren, basierend auf künstlicher Intelligenz (KI), für die Detektion und Diagnose von Fehlzuständen der Schieneninfrastruktur. Im Zuge des Projektes werden außerdem große Teile der Streckennetze der Hamburger und

Braunschweiger Häfen mit etablierten Verfahren der Schienenzustandserfassung mehrfach hochgenau vermessen. Diese Referenzdaten sollen dazu dienen, die Algorithmen zur Detektion und Diagnose von Fehlstellen zu bewerten und KI-basierte Algorithmen zu trainieren.

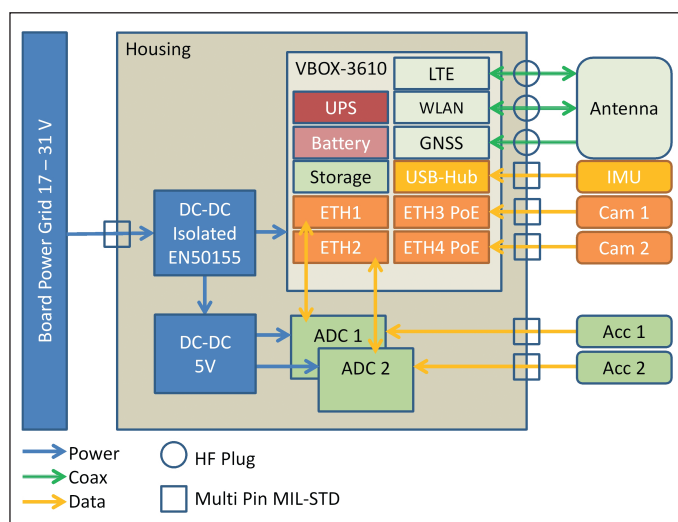
## Datenerfassung

Innerhalb des Projektes HavenZuG werden sowohl Daten mit eingebetteten Sensoren auf Rangiereinheiten als auch mit etablierten handgeführten Messgeräten erhoben. Die so gewonnenen Referenzdaten sollen den tatsächlichen Istzustand der Gleisinfrastruktur abbilden und können mit den fahrdynamischen Reaktionen, die mit den eingebetteten Sensoren gemessen werden, abgeglichen werden.

## Sensor-System zur eingebetteten Zustandsüberwachung

Das DLR betreibt seit 2015 Multi-Sensor-Systeme zur Erfassung georeferenzierter Achslagerbeschleunigungen im Braunschweiger Hafen. Diese Systeme werden im Zuge des Projektes HavenZuG weiterentwickelt und im operativen Einsatz evaluiert. Abb. 1 zeigt ein Blockschaltbild des für HavenZuG entworfenen Multi-Sensor-Systems. Das Erfassen, Verarbeiten, Speichern und Versenden der Sensordaten übernimmt ein für den Betrieb auf Schienenfahrzeugen zertifizierter Industrierechner, der unter anderem über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung, Festplattenanbindung, ein Kommunikationsmodul und einen Satellitennavigationsempfänger (GNSS) verfügt. Neben einer leistungsfähigen zentralen Recheneinheit soll in Zukunft auch eine Grafikkarte (GPU) verbaut werden, die zusätzlich für die Datenvorverarbeitung auf dem Fahrzeug genutzt werden kann.

Zur Erfassung der dynamischen Fahrzeugreaktionen (Vibrationen) werden breitbandige (0,8 Hz – 8000 Hz) triaxiale Achslagerbeschleunigungssensoren verwendet. Positions- und Geschwindigkeitsinformationen können aus den Daten des GNSS-Empfängers und einer inertialen Messeinheit (IMU) errechnet werden. Für die Georeferenzierung von Fahrzeugvibrationen werden die GNSS- und IMU-Daten offline mithilfe von digitalen Schienenkarten fusioniert, sodass nicht nur die geographischen Koordinaten, sondern auch die Positionen im Gleis ermittelt werden können [5]. Des Weiteren können für die Umfelderkennung zwei Kameras an das System angeschlossen werden. Die aufgenom-



**Abb. 1:** Blockschaltbild des für das Projekt HavenZuG entworfenen Multi-Sensor-Systems für die Erfassung von Achslagerbeschleunigungs-, Kamera- und Positionsdaten

menen Bilder können zum einen für die Georeferenzierung benutzt werden, z.B. indem Weichen oder bekannte Landmarken in den Bilddaten erkannt und in Positionsinformationen umgewandelt werden, und zum anderen hilfreiche Informationen für die Zustandserfassung liefern wie z.B. Wetterbedingungen oder Verschmutzungen der Gleise.

### Referenzdaten

Umfangreiche Referenzdaten werden benötigt, um den tatsächlichen Zustand der Schieneninfrastruktur festzustellen. Dieser bietet die Grundlage für die Entwicklung und das Testen der Analyseverfahren für die Multi-Sensor-Daten. Für die Referenzdatenerfassung wird auf etablierte Verfahren der Schienenzustandserfassung zurückgegriffen. Nach der erfolgten umfangreichen ersten Datenerfassung zum Projektbeginn sind gezielte Wiederholungsmessungen vorgesehen, sodass Veränderungen an der Gleisinfrastruktur über den Projektzeitraum bis Ende 2021 erfasst werden können. Es werden sowohl die Längswelligkeit als auch die Gleislage (Spurweite, Überhöhung, Verwindung) mit zwei unterschiedlichen handgeführten Messgeräten aufgezeichnet. Besondere Auffälligkeiten an der Gleisinfrastruktur werden darüber hinaus fotografiert und dokumentiert und deren exakte Position mit einem hochgenauen differentiellen GPS-Empfänger bestimmt.

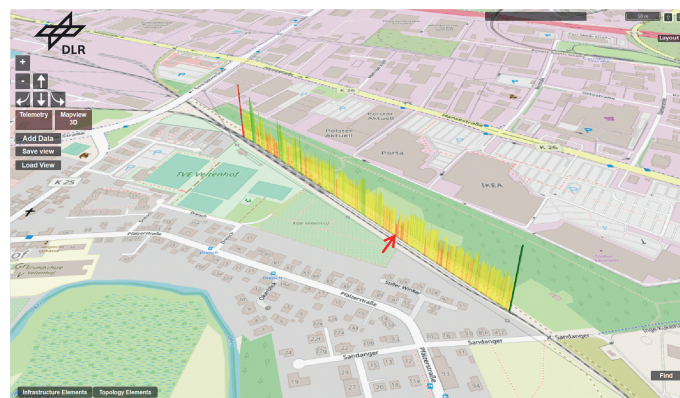
Dasselbe Prinzip wird verwendet, um die Start- und Endpunkte der einzelnen Messabschnitte aufzunehmen, sodass eine zentimetergenaue Georeferenzierung der Referenzdaten möglich ist. Dies ist von besonderer Bedeutung, um zum einen die Referenzdaten untereinander und zum anderen mit den Daten der eingebetteten Sensoren vergleichen zu können. Abb. 2 zeigt die gemessene Spurweite der Referenzdaten, die mithilfe der gleisgenauen Georeferenzierung auf dem Gleis verortet wurde. Die Visualisierung erfolgt auf dem Web-Frontend des am DLR ent-

wickelten Datenmanagementsystems [6].

### Datenanalyse

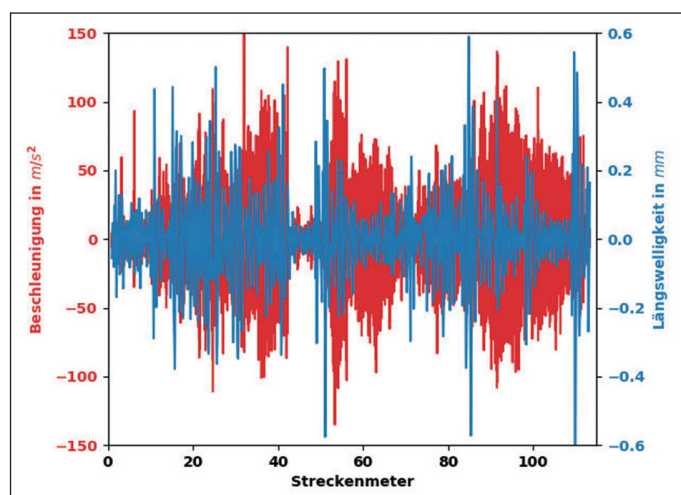
Die Analyse der Sensordaten hat zum Ziel, Auffälligkeiten in den dynamischen Fahrzeugreaktionen zu detektieren und diese in Zusammenhang mit dem Streckenzustand zu bringen. Dies geschieht unter Einbeziehung der Referenzdaten. Für die Detektion relevanter Fehlzustände werden im Rahmen einer explorativen Datenanalyse mit überwachten maschinellen Lernverfahren [7] charakteristische Merkmale in den hochfrequent abgetasteten Achslagerbeschleunigungsdaten identifiziert. Die Merkmalsextraktion soll zukünftig bereits auf dem Rechner des eingebetteten Multi-Sensor-Systems stattfinden, um die Menge der zu speichernden Daten zu reduzieren. Für die Diagnose, also die Herstellung einer Beziehung zwischen Ursache und Wirkung, werden sowohl rein datengetriebene, selbstlernende Ansätze als auch mit physikalischen Modellen gestützte hybride Ansätze [8] verfolgt.

Des Weiteren sollen Trends in den Daten erkannt werden, die auf einen etwaigen Verschleiß der Gleisinfrastruktur hindeuten und unter Umständen eine Prognose für das Auftreten eines Schadens erlauben. Weiterhin gilt es zu untersuchen, ob maschinelle Lernverfahren dafür genutzt werden können, Fehlstellen im Gleis, die für gewöhnlich mit klassischen Inspektionsverfahren detektiert werden, mithilfe der Sensordaten zu erkennen und den entsprechenden Kennzah-

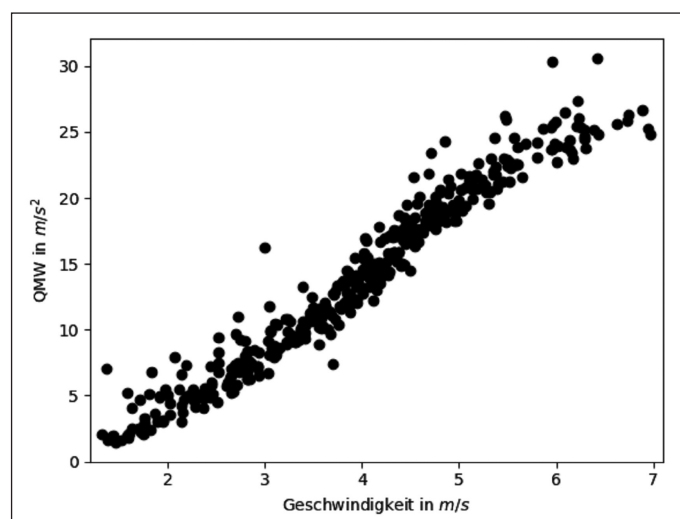


**Abb. 2:** Georeferenzierte Referenzdaten (Spurweite) eines Gleisabschnittes, dargestellt auf dem vom DLR betriebenen Web-Frontend. Die Werte bewegen sich zwischen 1429 mm (rot) und 1443 mm (grün). Der rote Pfeil zeigt eine relevante Spurweitenverengung an. Quelle Kartenmaterial: OpenStreetMap

len wie Überhöhung, Verwindung und Längswelligkeit zuzuordnen. Die erhobenen Referenzdaten dienen dabei dem Training der Modelle. Abb. 3 zeigt Achslagerbeschleunigungen (rot) sowie die mit einem handgeführten Messgerät gemessene Längswelligkeit (blau). Das Beispiel illustriert, dass beide Messreihen einen grundsätzlich vergleichbaren Signalverlauf aufweisen (z.B. sehr geringe Werte im Abschnitt zwischen 42 m bis 49 m). Gleichzeitig wird deutlich, dass für die Ableitung von aussagekräftigen Informationen zur Längswelligkeit aus den gemessenen Achslagerbeschleunigungen anspruchsvolle Datenanalyseverfahren erforderlich sind. Dabei ist zu beachten, dass die gemessenen fahrdynamischen Reaktionen von vielen verschiedenen Faktoren abhängen, die den Einfluss der Gleisinfrastruktur teilweise deutlich übersteigen. Insbesondere die Fahrzeuggeschwindigkeit hat einen großen Einfluss auf die Amplitude der Beschleunigungen (Abb. 4). Weitere Einflussfaktoren sind der Zustand der Räder (Rundheit, Flachstellen) und anderer Fahrzeugkompo-

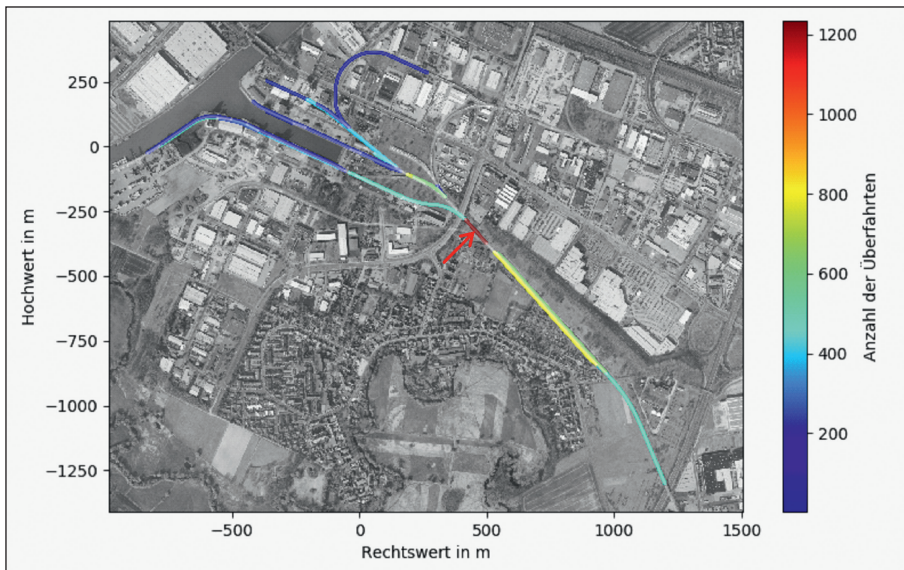


**Abb. 3:** Gemeinsame Darstellung von Sensor- und Referenzdaten: Achslagerbeschleunigungsdaten, gemessen mit dem eingebetteten Multi-Sensor-System (rot), zusammen mit der Längswelligkeit, gemessen mit handgeführtem Gerät (blau)



**Abb. 4:** Quadratischer Mittelwert (QMW) der Achslagerbeschleunigungsdaten in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für mehrere Fahrten über den meistgenutzten Streckenabschnitt im Braunschweiger Hafen





**Abb. 5:** Anzahl der Überfahrten per Gleisabschnitt zwischen 2015 und 2018. Der rote Pfeil markiert den Abschnitt mit den meisten Befahrungen. Quelle Kartenmaterial: Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation

nennten, Wettereinflüsse, Zusammensetzung und Beladung des Zuges und nicht zuletzt der Zustand des Sensors und seiner Befestigung. Einige dieser Einflussfaktoren können mithilfe der eingebetteten Sensoren direkt oder indirekt erfasst werden. So wird die Fahrzeuggeschwindigkeit aus der Georeferenzierung mittels GNSS und IMU bestimmt. Wetterinformationen wie Niederschlagsereignisse oder Verschmutzungsgrad der Strecke lassen sich aus den Kameradaten gewinnen. Andere Einflüsse, wie z.B. die Beladung des Zuges, lassen sich, mit dem hier vorgestellten Sensorsystem, jedoch nicht ermitteln. Gegenstand der aktuellen Forschung ist

es, die Einflüsse der für die Überwachung der Gleisinfrastruktur nicht relevanten Faktoren zu quantifizieren und zu eliminieren. Ein weiterer Aspekt der Datenanalyse ist die Entwicklung von Verfahren, die eine hochgenaue relative räumliche Zuordnung der Sensordaten ermöglichen. Dies soll die Vergleichbarkeit von wiederholten Befahrungen eines Streckenabschnittes verbessern. Aus der Georeferenzierung ergibt sich außerdem, welche Gleise wie oft (Abb. 5) und mit welcher Geschwindigkeit überfahren wurden. Diese Informationen über die Belastung der einzelnen Gleisabschnitte stehen gerade Betreibern kleinerer Streckennetze in dieser

Form nicht zur Verfügung, haben aber einen hohen Wert für das Asset Management. Zukünftig soll mithilfe der gewonnenen Referenzdaten untersucht werden, ob sich die Informationen über die Nutzungshäufigkeit zusammen mit den über die eingebetteten Sensoren gemessenen Fahrzeugreaktionen nutzen lassen, um Verschleißraten zu bestimmen. ■

#### QUELLEN:

- [1] Weston, P.; Ling, C.; Robert, C.; Goodman, C.; Li, P.; Goodall, R.: Monitoring vertical track irregularity from in-service railway vehicles. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 221 (2007), Nr. 1, S. 75–88
- [2] Baasch, B.; Groos, J. C.; Roth, M.: Sensorgestützte Anomaliedetektion zur Zustandsbewertung der Schiene mit Regelzügen. In: ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 12/2018, S. 32–35. URL <https://elib.dlr.de/121905/>
- [3] Groos, J. C.; Roth, M.; Havrila, P.: Zustandsüberwachung mit kostengünstigen Multi-Sensor-Systemen. In: EI – DER EISENBAHNINGENIEUR, 10/2017, S. 41–45
- [4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: HavenZuG - Hafenbetrieboptimierung durch vorausschauende eingebettete Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur. URL [https://www.innovativ-ehafentechnologien.de/wp-content/uploads/2018/12/IHATEC\\_Projektsteckbrief\\_HavenZuG\\_formatiert.pdf](https://www.innovativ-ehafentechnologien.de/wp-content/uploads/2018/12/IHATEC_Projektsteckbrief_HavenZuG_formatiert.pdf)
- [5] Roth, M.; Baasch, B.; Havrila, P.; Groos, J. C.: Map-Supported Positioning Enables In-Service Condition Monitoring of Railway Tracks. In: International Conference on Information Fusion (FUSION), 2018, S. 2346–2353
- [6] Schubert, L. A.; Böttcher, O.; Roth, M.: Datenmanagementsysteme für die Digitalisierung im Bahnbereich: Digitale Managementsysteme unterstützen bei der Verwaltung und Wartung von Eisenbahninfrastruktur. In: EI – DER EISENBAHNINGENIEUR, 11/2018, S. 16–19. URL <https://elib.dlr.de/121116/>
- [7] Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J.: The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. 2nd ed. New York [etc.]: Springer, op. 2009
- [8] Schenkendorf, R.; Dutsch, B.; Lüddecke, K.; Groos, J. C.: Improved Railway Track Irregularities Classification by a Model Inversion Approach. In: EBALLARD, Ioana; BREGON, Anibal (Hrsg.): Proceedings of the Third European Conference of the Prognostics and Health Management Society 2016: PHME 2016, 2016, S. 62–69



#### Dr. Benjamin Baasch

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt DLR e.V., Berlin  
[benjamin.baasch@dlr.de](mailto:benjamin.baasch@dlr.de)



#### Dr. Judith Heusel

Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt DLR e.V., Braunschweig  
[judith.heusel@dlr.de](mailto:judith.heusel@dlr.de)



#### Dr. Jörn C. Groos

Gruppenleiter  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt DLR e.V., Braunschweig  
[joern.groos@dlr.de](mailto:joern.groos@dlr.de)



#### Sangeetha Shankar

Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt DLR e.V., Braunschweig  
[sangeetha.shankar@dlr.de](mailto:sangeetha.shankar@dlr.de)

DR. PLICA INGENIEURE  
PARTNERSCHAFT FÜR BAUWESEN

# ZSX-Zwillingsschwelle

**Leonhard Moll**  
Betonwerke

Der ZSX-Oberbau für eine stabile Gleislage in engen Bögen!

Eine wirtschaftliche Alternative zum Einbau von Sicherungskappen wurde im Regelwerk der DB Netz AG eingeführt!

Leonhard Moll Betonwerke GmbH & Co KG | [www.moll-betonwerke.de](http://www.moll-betonwerke.de) | [info@moll-betonwerke.de](mailto:info@moll-betonwerke.de)